

Lo propio sucedería por lo que respecta á la acción del Sol, y también por análoga razón, en el caso de que se admita la forma elipsoidal del globo (que, como nadie ignora, es poco más ó menos la verdadera), si el elipsoide terrestre tuviera su eje perpendicular al plano de la eclíptica. En efecto, entonces durante todo el curso de su revolución alrededor del Sol la acción de la masa de este astro sobre el globo terráqueo sería tan igual encima como debajo del plano de la órbita; la resultante pasaría por el centro de gravedad de la Tierra. Pero sabemos que no es así, y que el eje alrededor del cual ejecuta nuestro planeta su rotación diurna está inclinado unos $23^{\circ} 28'$ sobre el plano de la órbita.

En realidad podemos considerar á nuestro globo como formado de dos partes inva-

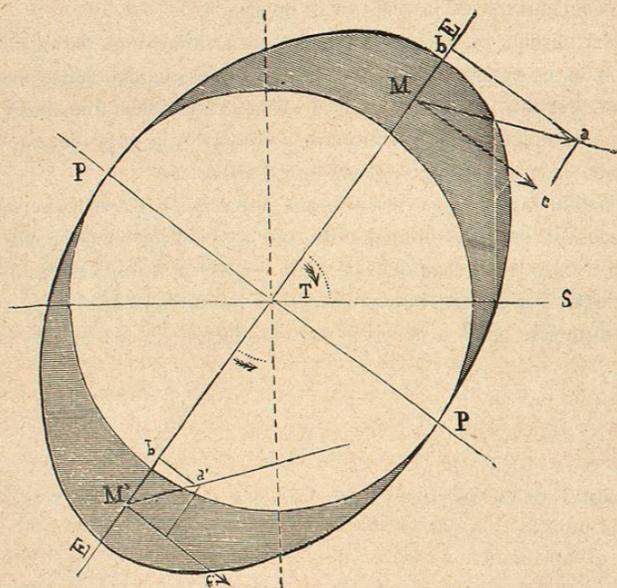


Fig. 129.—Explicación mecánica de la precesión de los equinoccios

riablemente unidas entre sí. La una es un núcleo esférico que tiene por radio el radio de los polos; en esta parte es nula la acción de la gravitación del Sol y de la Luna, en cuanto se refiere al movimiento de rotación. La otra parte es el ensanchamiento ecuatorial, cuyo espesor va creciendo de los polos al ecuador.

La acción de la gravitación luni-solar en este ensanchamiento es la causa de la *precesión* y de la *nutación*. Para darnos cuenta de ella, empecemos por considerar aisladamente la acción de la masa del Sol en la época de uno de los solsticios. El globo terráqueo ocupa entonces la posición de la figura 129, con respecto al radio vector TS. Una molécula M de la dilatación ecuatorial está sometida á una fuerza que puede descomponerse en dos, Mb y Mc. La molécula simétricamente situada, M', está sometida á la atracción M'a', menor que la primera, por cuanto se halla colocada á mayor distancia del cuerpo atrayente, y se puede descomponer asimismo en dos fuerzas M'b' M'c' respectivamente menores que Mb y Mc. Además las componentes Mb y M'b' pasan por el centro del esferoide y su resultante igual á su suma no puede afectar el movimiento de rotación. Mc y M'c' obran en el mismo sentido en los extremos de brazos de palancas

iguales; su resultante, que es también igual á su suma, obra en un punto del radio TM, pero encima del plano de la eclíptica.

Esta acción propende, pues, á inclinar TM sobre TS, es decir, á disminuir la oblicuidad de la eclíptica.

Otro tanto podría decirse de todas las moléculas del ensanchamiento ecuatorial, las cuales se distribuyen dos á dos en grupos, delante y detrás del plano que pasa por el centro de la Tierra, perpendicularmente á la eclíptica. Todas estas moléculas están solidariamente enlazadas, y como las resultantes de todos los grupos tienen la misma tendencia, se puede considerar la acción del Sol como la resultante de todas estas acciones elementales. Esta resultante produciría un movimiento del ecuador hacia la eclíptica, es decir, una disminución de la oblicuidad, si la Tierra estuviese inmóvil sobre su eje; pero combinándose el efecto con la fuerza que produce el movimiento de rotación, se convierte en una retrogradación de la línea de los nodos, es decir, de la intersección del plano del ecuador con el plano de la eclíptica.

En resumen, el fenómeno reconoce por causa la desigualdad de acción de la masa atrayente sobre las dos fracciones del ensanchamiento ecuatorial, una de las cuales se presenta directamente al Sol, y la otra, que está en la parte posterior del esferoide terrestre, se halla á mayor distancia del astro. Esta desigualdad llega á su máximo en uno ú otro solsticio; siendo, por el contrario, nula en cada equinoccio, ó para hablar con más exactitud, no produce ningún efecto en el movimiento de rotación, porque entonces la fuerza resultante se aplica al centro de gravedad de la Tierra.

En todo lo que precede tan sólo hemos considerado las moléculas que componen la dilatación ecuatorial; si ésta existiera sola, la precesión anual sería mucho más considerable de lo que indican las observaciones. En realidad, la masa de dicha dilatación está unida á la del núcleo esférico, y como no es más que una fracción muy pequeña de éste, el movimiento retrógrado que sufre debe comunicarse á la masa entera de la Tierra, de suerte que el efecto resultante es mucho menor.

Tal sería la precesión, tal la causa que la produce, si el Sol fuese el único que actuara sobre el ensanchamiento ecuatorial de la Tierra. Pero, aparte de la acción de su masa, cuya magnitud está compensada, desde este punto de vista, por la inmensidad de la distancia, hay que contar con la Luna, cuya masa es en verdad 26 millones de veces menor que la del Sol, pero cuya distancia á la Tierra es también 385 veces menor que la del astro solar.

La acción de la Luna se agrega en realidad á la del Sol para producir la precesión, y el efecto total, al que se da en este caso el nombre de *precesión luni-solar*, es el que hemos indicado más arriba y en virtud del cual la línea de los equinoccios retrograda anualmente un ángulo de $50''{,}3$.

Pero, además de este efecto, la Luna produce otro, originado por las variaciones de posición que sufre el plano de su órbita en un intervalo periódico de $18^{\frac{2}{3}}$ años. De aquí resultan variaciones en la precesión y variaciones de período igual en la oblicuidad de la eclíptica. Este es el fenómeno que hemos descrito anteriormente con el nombre de *nutación*.

Así pues, la teoría de la gravitación habría bastado para descubrir las perturbaciones del movimiento de rotación de la Tierra, si la observación no hubiera indicado muchos siglos hace la existencia de la parte más considerable y discernible, la precesión; en cuanto á la nutación, Bradley la hubiera deducido de sus observaciones tan pronto como sospechó su verdadera causa. Por lo demás, la perfecta concordancia que presentan, por

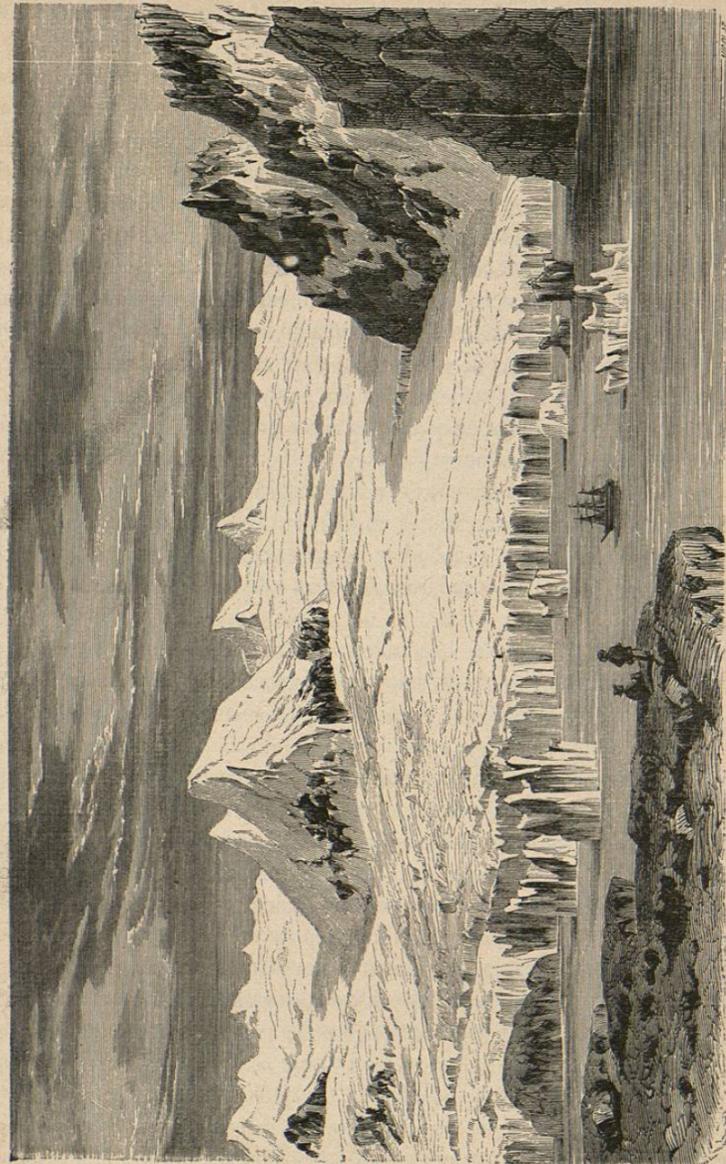
una parte, las fórmulas mecánicas, y por otra las medidas efectivas, no da lugar á duda alguna. Pero lo más maravilloso, lo más digno de la admiración reflexiva de los hombres de ciencia, es ese encadenamiento de los efectos y las causas, de las acciones y reacciones de la fuerza de gravitación, que resalta de la comparación de fenómenos que en apariencia son completamente extraños unos á otros. ¿A qué causa se deben esas lentas oscilaciones de períodos desiguales, ese balanceo cónico del eje de rotación de la Tierra ó del plano de su ecuador? A la acción de las masas del Sol y de la Luna sobre la parte no esférica de nuestro globo, según acabamos de ver. Este efecto de la fuerza de la gravitación no hubiera ocurrido si el globo tuviese la forma rigurosa de la esfera. Pero ¿qué razón hay para esta falta de esfericidad? Ya lo hemos dicho: la acción de la gravedad combinada con la fuerza centrífuga engendrada por la rotación, que ha producido el achatamiento de la Tierra en sus polos ó motivado el ensanchamiento ecuatorial. El efecto se ha convertido á su vez en causa, como lo exigen los principios de la mecánica racional, no siendo, lo repetimos, la realidad de estos fenómenos tan complejos el menor testimonio de la teoría que concibió el genio poderoso de Newton y cuyas consecuencias han sabido desarrollar tan admirablemente sus sucesores.

V

CAUSAS ASTRONÓMICAS DE LOS PERÍODOS GLACIALES

En la época actual, cierto número de masas montañosas, como los Alpes, los Pirineos, los Andes meridionales y los Alpes de la Nueva Zelanda, contienen glaciares. En todas las regiones en que la altitud es suficientemente elevada, en que los vientos reinantes llevan consigo bastante cantidad de vapores para producir abundantes nevadas, la acumulación de las masas de nieve puede dar lugar, á causa de la presión, á la conversión continua de la nieve en hielo, y luego al movimiento de progresión que constituye la marcha de los glaciares. Pero, á excepción de las comarcas polares, en donde los glaciares existen todavía en espacios y proporciones considerables, por ejemplo en Groenlandia y en el Spitzberg, los puntos del globo invadidos hoy por aquéllos presentan únicamente una superficie limitada, que no es más que una pequeñísima fracción del área ocupada por las masas de montañas. La época actual, á pesar de sus glaciares y aunque se la haga retroceder hasta más allá de los tiempos históricos, no es ni puede ser considerada como un período glacial.

La primera época geológica á la cual ha podido dar la ciencia legítimamente este nombre está comprendida entre el fin de la época terciaria y los comienzos de la cuaternaria, ó más bien en el mismo principio de ésta. Los glaciares tenían entonces una extensión considerable. Todas las masas montañosas de Europa, los Vosgos y el Jura, el Morván y las Cevennas, los Alpes y los Pirineos, estaban invadidas por ellos; los glaciares de los Alpes cubrían toda la Suiza y descendían por el valle del Ródano hasta Lyon; los de los Pirineos se extendían por las llanuras hasta la escasa altitud de 200 metros. "Para acabar de dar una idea del prodigioso desarrollo de los glaciares, dice M. Vezián, sabio profesor de la facultad de ciencias de Besançon, añadamos que había una sábana de hielos y nieves persistentes, sin interrupción alguna, desde el monte Blanco hasta el polo boreal. El casquete helado que rodeaba el polo llegaba hasta las inmediaciones de París, y faltaba poco para que nuestro hemisferio entero desapareciese bajo un vasto sudario de nieves perpetuas."



UN GLACIAR EN EL SPITZBERG

A este verdadero período glacial, cuya duración debería contarse, según M. Lyell, no por decenas, sino por cientos de miles de años, siguió una época en que los glaciares desaparecieron progresiva y parcialmente por haber subido la temperatura; luego sobrevino, aunque en menos proporciones, un nuevo desarrollo de los mismos fenómenos, de suerte que se pueden contar dos períodos glaciales en la edad geológica de que aquí se trata, es decir, durante la época cuaternaria.

Estos son los únicos períodos de que hacían mención, poco tiempo ha, los tratados de geología; mas hoy, y este punto es de gran importancia para la cuestión que nos ocupa, se conviene generalmente en que ha habido otras épocas glaciales en las edades anteriores. M. Vezián ha aducido muchas pruebas de ello en una lección sobre el período glacial falúnico, y M. Lyell ha consignado en sus *Principios de Geología* todos los vestigios observados por Ramsay y otros geólogos, los cuales prueban con mayor ó menor evidencia la acción glacial en las épocas terciarias y secundarias, en el mioceno superior, en el eoceno, en el terreno carbonífero y en el devónico. Sin embargo, cuando se llega á las capas más antiguas de los terrenos paleozoicos, se desvanecen cada vez más las huellas de esta acción, y se ve que han desaparecido poco á poco los caracteres merced á los cuales se pueden conocer los períodos glaciales, como los cantos erráticos y los guijarros estriados, las rocas bruñidas y rayadas por el acarreo de las masas de hielos y los aluviones glaciales, de suerte que no puede asegurarse si la falta de estos vestigios en los terrenos cámbrico, silúrico y lauréntico prueba que las edades geológicas á ellos correspondientes no han sido testigos de períodos glaciales, ó si, en caso afirmativo, ha habido simplemente desaparición y por último destrucción de los indicios, relativamente poco duraderos, por medio de los cuales se revela la acción de los glaciares.

Por lo demás, basta saber para el estudio de la cuestión que en la sucesión de las edades geológicas ha habido, no ya un solo período glacial, sino una serie más ó menos numerosa de períodos semejantes que no podemos definir mejor de lo que lo ha hecho M. Vezián en estos términos: "Debe entenderse por *período glacial* una época durante la cual sufrió momentáneamente la temperatura un descenso bastante notable, ya para originar la aparición de los glaciares, dado caso de que no existiesen desde la época anterior, ó bien para darles, si es que existían, una expansión mucho mayor."

¿De qué circunstancias meteorológicas ó físicas depende la formación del hielo?

Nadie lo ignora. Es preciso que, principalmente mientras duran las estaciones invernales, caigan copiosas nevadas en la región montañosa en que aquél se forma; es necesario que las nieves acumulen en ella masas bastante grandes para resistir los efectos reunidos de la evaporación y de la fusión originada durante los estíos por la radiación solar. Así pues, una de las condiciones indispensables para los fenómenos de los glaciares es una altitud elevada, si la región que se considera está en las zonas templadas, ó á falta de la altitud, un clima ártico ó polar en las altas latitudes. En una palabra, es necesario el frío, pero un frío intenso, siquiera no lo sea menos el calor, según lo han hecho observar con mucha razón Tyndall y otros físicos; porque la abundancia de nieves implica una previa y abundante formación de vapor de agua en la atmósfera, y la evaporación de que se trata no puede deberse sino á la acción de una temperatura elevada, tanto en la superficie del mar como en las capas atmosféricas que sobre ella pesan. Una vez formado el vapor y transportado por las corrientes aéreas, ya sea á la cumbre de las montañas, ó bien á las regiones polares, experimenta allí una condensación y un enfriamiento suficientes para convertirlo en nieve. A no ser por el calor de

que hablamos y sea cualquiera su origen, ni habría evaporación ni nieves, y por consiguiente tampoco glaciares; á no ser por el transporte de las masas de vapor y la baja temperatura que no tan sólo lo condensa, sino que también lo hiela, podría haber lluvias abundantísimas, pero no nieves y por lo tanto tampoco glaciares.

Tales son, en dos palabras, las condiciones físicas del fenómeno general, abstracción hecha de todos los detalles secundarios. Ambas condiciones existen hoy, han existido durante la época actual y probablemente también durante todas las épocas geológicas en mayor ó menor escala. Para que determinen un período glacial, en el sentido en que lo comprenden los geólogos y según la definición que más arriba hemos dado, es, pues, preciso que una ú otra de dichas condiciones, ó las dos á la vez, hayan sufrido en ciertas edades marcadas alternativas de aumento ó disminución en la intensidad de su modo de manifestarse. Es preciso que el enfriamiento haya sido muy grande durante un espacio de tiempo suficientemente largo para que las nieves hayan invadido varias regiones hasta entonces respetadas, cubriéndolas de glaciares.

Examinemos, pues, las causas posibles de enfriamiento del globo terráqueo, para ver á cuáles se puede atribuir los fenómenos glaciales.

La Tierra recibe en su superficie calor de tres focos principales. El primero es el que le pertenece exclusivamente, el que posee en el interior de su masa y que es un calor de origen. El segundo procede de la radiación directa del Sol, que, según es sabido, se difunde con bastante desigualdad por uno ú otro hemisferio, según que varíen las estaciones para un mismo lugar ó la latitud para dos lugares diferentes. El tercer foco de calor es el que procede de las radiaciones de los demás astros, el que constituye lo que se llama la temperatura del espacio, temperatura que marcaría un termómetro en el sitio que ocupa nuestro globo á cada instante, si llegaran á extinguirse su calor interno y la radiación solar. Los físicos no están acordes sobre el grado de elevación de esta temperatura, pero en todo caso dista mucho de ser despreciable, y probablemente constituye una fracción importante de la temperatura que establece en el espacio la radiación del mismo Sol.

No podemos decir otro tanto del calor interior que, desde las edades geológicas, ejerce escasa influencia en la temperatura de la superficie del globo; pues, según las averiguaciones de Fourier, no puede contribuir actualmente á elevar la temperatura sino en una fracción de grado insignificante ($\frac{1}{30}$).

Basta, pues, examinar qué variaciones pueden tener los otros dos focos, ambos astronómicos. Pero pronto veremos que también es posible explicar los fenómenos glaciales atribuyéndolos á un enfriamiento local dependiente de causas físicas ó terrestres.

Procedamos con orden y enumeremos ante todo las diferentes variaciones de origen astronómico capaces de producir un enfriamiento local ó general en la superficie del planeta.

La curva que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, sino que forma una elipse cuyo foco lo ocupa el Sol. Así pues, las distancias á este astro varían de continuo, y por consiguiente también varía la intensidad del calor que envía á la Tierra. Además, el eje de rotación terrestre, ó lo que es lo mismo, el plano del ecuador está inclinado sobre el plano de la órbita cierto ángulo que se llama *oblicuidad de la eclíptica*. De ambas circunstancias resultan todas las variaciones de temperatura que se suceden en el ciclo del año trópico y que constituyen las estaciones de ambos hemisferios.

Dos líneas, las de los equinoccios y de los solsticios, determinan, en virtud de la velocidad variable del planeta, el tiempo que invierte en recorrer cada uno de los cuatro

arcos desiguales así formados. Otra línea digna de tenerse en consideración es la de la dirección del eje mayor, llamada *línea de los ápsides*: la Tierra se halla en uno ú otro de los extremos de esta línea, ya á su menor distancia del Sol, ó sea en el perihelio, ó bien á su mayor distancia, esto es, en el afelio. Si la línea de los equinoccios y la de los ápsides conservaran siempre, en la sucesión de los tiempos, una posición relativa invariable, no podría ocurrir cambio ni variación alguna en el orden ni en la duración de las estaciones que, si bien continuarían desiguales, serían por lo menos constantes en cada hemisferio. Pero ya hemos visto que hay dos fenómenos astronómicos que contribuyen á modificar de continuo esta posición relativa. El primero es la precesión de los equinoccios. El segundo, que es un movimiento contrario al anterior, cambia la dirección de la línea de los ápsides: es el movimiento del perihelio. A causa de la combinación de estos dos movimientos, los equinoccios y los solsticios y todas las posiciones intermedias cambian constantemente en la órbita elíptica de nuestro planeta, resultando de aquí que el origen de las estaciones y sus duraciones relativas varían en el curso de las edades, de modo que recorren un ciclo entero en un período que puede calcularse en 21,000 años en números redondos.

Pero estas variaciones no son las únicas, porque tampoco permanece constante la oblicuidad de la eclíptica, sino que disminuye unos $0''$,5 cada siglo, ó más claro, que el eje del globo se endereza esos cinco décimos de segundo cada cien años. Todavía no se ha podido precisar con toda exactitud los límites de esa lenta variación, que si llegara á ser indefinida, ocasionaría á la larga la perpendicularidad del eje, la igualdad de los días y las noches todo el año é igual distribución de la luz y el calor en los dos hemisferios, estado que se califica con bastante impropiedad dándole el nombre de primavera eterna. Pero si la teoría no ha podido determinar todavía los límites entre los cuales oscila la oblicuidad de la eclíptica, sabe sin embargo que estos límites existen y que, después de haber disminuído hasta bajar, según Laplace, como $1^{\circ} 20'$, la oblicuidad se estacionará para emprender de nuevo una marcha creciente.

Por último, otra variación secular modifica la órbita de la Tierra: la del elemento que se llama excentricidad. ¿Cuánto importa esta variación secular? Biot calculaba esta disminución en 1,400 leguas por siglo ó sea 14 por año: todos los años se acerca la Tierra 14 leguas al Sol en el afelio, y se aleja otras tantas en el perihelio. Hace unos 200,000 años que la excentricidad debió llegar á su último máximum.

Para explicar los períodos glaciales se ha recurrido á otros fenómenos astronómicos independientes del movimiento de nuestro planeta, pero que pueden modificar su estado térmico. Sábese que la actividad de la radiación solar está sujeta á oscilaciones: verdad es que los períodos conocidos son tan cortos que seguramente no tienen ni pueden tener ninguna relación con los períodos glaciales; pero debemos decir que algunos astrónomos se inclinan á suponer que esta actividad ha podido experimentar crisis más ó menos análogas á las que ocurren en las estrellas efímeras, en las estrellas variables de largos períodos. Consignemos, sin embargo, como recuerdo el paso de largos regueros nebulosos ó meteóricos, que interponiéndose por espacio de años, de siglos enteros, entre el Sol y la Tierra, pueden haber sido causa de enfriamientos más ó menos duros.

Se ha querido también explicar estos cambios diciendo que dimanaban del movimiento de traslación que arrastra por el espacio á todo el sistema solar, y con él á nuestra Tierra, en dirección de la constelación de Hércules. Suponiendo que la temperatura del espacio varíe según las regiones recorridas, puede concebirse que nuestro

globo haya pasado diferentes veces por ciertas regiones que han producido en su superficie enfriamientos más ó menos intensos y á propósito para explicar la aparición de los períodos glaciales.

Finalmente, debemos mencionar asimismo una postrera hipótesis, que ya no es astronómica, sino que pertenece al dominio de la física terrestre ó de la geología, y á la cual parece atribuir Lyell la mayor importancia en la producción de los fenómenos glaciales. Nos referimos á los movimientos que continuamente ocurren en la costra sólida del globo, en el relieve, distribución y altitud de las masas continentales, en los levantamientos ó hundimientos alternativos del suelo y del fondo de los mares.

Terminada ya nuestra enumeración, veamos qué influencia se puede atribuir á la precesión de los equinoccios, al movimiento del perihelio y á la variación de excentricidad.

El solsticio de invierno del hemisferio boreal está actualmente casi á 10° del perihelio: hacia el año 1250 estos dos puntos coincidían y la línea de los solsticios formaba una sola línea con la de los ápsides. Resulta de aquí, como es sabido, una diferencia notable en la duración de las estaciones en cada hemisferio, pero sobre todo en las condiciones térmicas de las estaciones opuestas comparadas de un hemisferio á otro. En el hemisferio Norte, las estaciones invernales son más cortas y además corresponden á las distancias menores del Sol á la Tierra. Las estaciones estivales son las más largas y comprenden las distancias mayores. Síguese de aquí una especie de compensación que hace menos desiguales las temperaturas medias de estas estaciones. Lo contrario precisamente sucede en el hemisferio austral, que, por razones forzosamente contrarias, tiene veranos más cortos y más calurosos, inviernos más largos y más fríos, y en una palabra, condiciones más favorables para que ocurran fenómenos glaciales.

A causa de la precesión de los equinoccios y del movimiento inverso del perihelio, se dará el caso contrario en un intervalo de unos 10,500 años, es decir, en el año 11750. Hay dos períodos intermedios que corresponden á la coincidencia de la línea de los equinoccios con la de los ápsides. Así, en el año 3985 antes de nuestra era, el perihelio y el equinoccio del otoño boreal estaban en un mismo punto, y lo propio sucederá dentro de cuarenta y seis siglos, hacia el año 6480, en que el equinoccio de la primavera boreal caerá á su vez en el día del paso de la Tierra por el perihelio, ó sea á su menor distancia del Sol.

Estos cambios incontestables que hacen que cada 10,500 años alternen períodos de enfriamiento y de elevación de temperatura de un hemisferio á otro, ¿son tal vez causa de los fenómenos glaciales? No falta quien lo haya sostenido así, y especialmente M. Adhemar en sus *Revoluciones del mar*, explicando de tal modo los períodos glaciales á la vez que los fenómenos diluvianos. Pero se ha objetado con razón que una diferencia de ocho días entre las duraciones de las estaciones invernales reunidas y las de las estivales es sobrado insignificante para explicar unos fenómenos tan notables como los de los períodos glaciales. Además, nuestro hemisferio austral debería de encontrarse hoy en semejantes condiciones, lo cual no se nota en modo alguno. Por último, á los geólogos les parece muy corto el período de 10,500 años en atención á la duración probable de los períodos glaciales y de los interglaciales. Por lo demás, es imposible separar de unos fenómenos que se desarrollan simultáneamente ciertas causas de variación que tan pronto pueden obrar de consuno como en sentido opuesto, pero que están necesariamente mezcladas en la Naturaleza.

Las variaciones de la excentricidad son más importantes que las de que acabamos