

The scientific history of climate change 1820–2020

Helgi Björnsson

Jarðvísindastofnun Háskólans, Sturlugötu 7, 102 Reykjavík

email: hb@hi.is <https://doi.org/jokull2024.74.071>

Glaciologists and meteorologists described shrinkage of glaciers in the northern hemisphere in the early 20th century. Warm southerly currents in the atmosphere and in the ocean caused the decrease. Scientists did not advance theories about the causes of the changes but discussed fluctuations of solar radiation and changes in trade winds. They encouraged colleagues to expand monitoring of glaciers which might lead to improved understanding and thanks to the interest of physicists, knowledge advanced of the natural causes of the glacier variations.

Traces of ice ages

An advance in the discussion of global climate change is traced to the early 19th century. For ages climate was meant to have been similar although it had shifted between cold and warm periods it always reached an equilibrium again, fluctuating around a long-time average. In the 1840s geologists observed signs indicating that large climate changes had taken place, i.e. traces of erosion and transport of ice sheets that had covered continents (Esmark, 1824; Agassiz, 1840; Wenez-Sitten, 1861; Tinkler, 1985; Hestmark, 2018). At the end of the 19th century geoscientists had found traces of four glacial periods in the Quaternary (the last 2.5 Ma). Glaciers formed and disappeared during the interglacials (Penck and Bruckner, 1909).

We can briefly describe how the geologists reached this understanding. In the 1860s they had traced glacial moraines far south in mid-Europe, pushed forward by an inland icesheet flowing from Scandinavia and glacial erratics which the glaciers left behind them when they retreated during interglacial

periods. Later geologists traced glacier variations after the end of the last glaciation (see De Geer, 1912). By combining data of glacial sediments and fossils geologists recognized that the glacial period ended 12 thousand years ago, and glaciers disappeared as the present interglacial took over.

Signs of lowered sea level indicated that a large water mass amassed in large icesheets upon land. The ice masses depressed the Earth's crust, up to hundreds of metres. When the ice melted the sea level rose, up to 120 m, but at higher elevations ancient shorelines were observed above the present sea level. Scientists discovered plant and animal fossils that lived in climates colder than found in the regions today, also shells and fish bones in lakes and former seabed. The organic material was dated by counting annual tree rings and reference to tephra layers in the soil. After the 1950s radioactive carbon, C^{14} , was applied for the dating. Since the 1960s ancient climate variations have been traced in ice cores from the ice sheets of Greenland and Antarctica and deep-sea sediment cores. The air temperature and the chemical composition of the atmosphere were traced in air bubbles and in the oxygen- and deuterium isotopes of the ice cores and the calcium carbonate shells of foraminifera, which had fallen on the seabed and were buried in mud (Emiliani, 1966). The ratio between the oxygen isotopes in the sea water, which the organisms had absorbed, changed with the temperature of the sea. Moreover, the glaciologists described glacier variations during a cold period from the 14th to the end of the 19th century, named the Little Ice Age.

Understanding the causes of climate change

After discovering the traces of ice ages, scientists began discussing their causes, occurring and disappearance. The French astronomer Alphonse Adhémar (1797–1862) suggested that ice ages were in phase with changes in the tilt of the earth's axis of rotation (Adhémar, 1842). The present tilt is 23.5° but changes regularly from 21.4° to 24.4° in 41,000 years, see <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Milankovitch>

The Scot, James Croll (1821–1890) pointed out the influence of the change in the orbit of the earth around the sun that changed in 100,000 years from being almost circular to becoming elliptical. In 1858 the French astronomer Urbain Leverrier had indeed pointed out that the distance between the sun and the earth varies throughout the year, winters are slightly longer in the southern than the northern hemisphere which he suggested might explain the large ice sheet of Antarctica. Leverrier and Croll asked whether cooling in the northern hemisphere might trigger feedback that led to an ice age. First, ice sheets expanded and reflection of solar radiation increased. The atmosphere became cooler, snowfall increased leading to still more collection of snow, and this effect proceeded with positive feedback. Further the strength of the solar radiation which falls on the earth changes due to precession (the change in the direction of the rotational axis of the earth, that in 26,000 years draws up a circle around the vertical line due to gravitational forces of the sun and the moon). In 1864, Croll was the first to discuss the impact of ocean currents and trade winds on climate.

The Serb Milutin Milankovitch (1879–1958) described with mathematical calculations the combined impact of these astronomical factors (Milankovitch, 1920, 1941). Together with the German meteorologist Wladimir Köppen (1846–1940) he considered how the astronomical variations might cause long-term climate changes and cause ice ages. When solar radiation decreased in the northern hemisphere, leading to colder summers, snow might start to accumulate and ice sheets and sea ice expand and reflection of solar radiation increase (Köppen and Wegener, 1924). This hypothesis, however, could not explain why an ice age struck at the same time on

both hemispheres. The total radiation reaching the earth remains the same but distributes differently over the earth's surface. Scientists were, however, hesitant and pointed out that that the model predicted more climate fluctuations than had been detected in sediments on the earth (Berger, 1988). But after the discovery in the 1970s of more fluctuations in climate in deep sea sediments in the Pacific Ocean, correspondence improved with model calculations. It became evident that the four glacial periods, known around 1900 were the latest of fifty glacial periods of the last ice age. During the last one million years, the temperature had fluctuated regularly in one hundred thousand years periods, where glacial stages were interchanged with short warm interglacial periods (when all three astronomical components acted together). If this remains, we might expect a cooling climate over the next twenty thousand years, but man-made pollution of the atmosphere might change that.

Currently it is held that changes in the strength of the solar radiation (however small), which Milankovitch described, initiate long-term changes in climate and they are magnified by the circulation of the atmosphere and the ocean, which control the transport of heat and humidity from the equatorial regions to the polar regions (Thompson, 2021). Astronomical causes thus were the initiation rather than the full explanation of the fluctuations between glacial- and interglacial periods. Current understanding implies that the synchronicity is the result of global CO_2 variations, at times modulated by variations in heat transport by ocean currents (Shakun *et al.*, 2012).

The atmosphere and the climate of the earth

Objective understanding of the impact of the atmosphere on climate can be dated back to the early 19th century. In 1824 the French physicist and mathematician Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768–1839) pointed out that the atmosphere must cause the earth's climate to be warmer than would be expected if it was controlled by the solar radiation alone (which he called the bright radiation) (Fourier, 1824). The energy from the sun reached easily through the atmosphere where it warmed up the earth's surface but the radiation from the warm earth (dark, discovered

around 1800, now called infra-red) could not get unhindered up through the atmosphere. The atmosphere managed to retain some of the heat energy and acted like a warm cover around the earth. Fourier did not talk about the impact of the chemical composition of the atmosphere on the heat exchange, but he considered water vapour to be important.

In 1856 the American scientist Eunice Newton Foote (1819–1888) demonstrated with experiments that radiation from the sun warmed air inside a closed tube, saturated by carbon dioxide or water vapour, more than if it contained dry air or hydrogen (Foote, 1856). Foote was therefore the first to point out the relationship between the concentration of atmospheric gases and the earth's climate. But in her days, she was best known as a suffragette and a painter.

The Irish physicist John Tyndall (1822–1893) demonstrated by spectrometry (in 1859, supposedly without knowing the work of Foote (Jackson, 2019)) that water vapour and carbon dioxide absorbed most of the heat radiation from earth (Tyndall, 1861). Therefore, these two gasses controlled mostly the temperature of the atmosphere, the water vapour two to three times more than carbon dioxide. Without the water vapour in the atmosphere the sun would rise each day above a cold and frozen earth. John Tyndall was a pioneer in glaciology, an author of a book on glaciers in the Alps and a renowned alpinist. He described the flow of glaciers, and he knew that thick glaciers had once covered lands in Europe.

Foote and Tyndall suspected that the concentration of carbon dioxide in the atmosphere had increased due to burning of coal after the beginning of the industrial revolution and that might have led to climate warming. They considered this beneficial for the growth of plants and increased food production. In the cold years of the 19th century there was greater concern that cold times might be ahead. Many questioned that one type of gas could cause considerable climate change. It was first in the mid-20th century that anybody began seriously to discuss whether human beings might cause harmful warming of the earth by burning coal.

Models of the impact of carbon dioxide on climate

Just before 1900 the Chemical Society of Stockholm (Kemistsamfundet) regularly discussed the causes of ice ages. They focused on the impact of chemical changes in the atmosphere on climate, mainly on carbon dioxide because its concentration could have changed over a long time due to chemical interaction between rock, ocean, atmosphere, and the biosphere. The geologist Arvid Gustaf Högbom (1857–1940) published a paper describing long-term secular changes which had taken place in the atmosphere during past historical times of the earth (Högbom, 1894). He described how carbon dioxide was bound in sedimentary layers and plants, and he described how the ocean absorbs carbon dioxide; also, how the weathering of rocks and volcanic activity could add carbon dioxide to the atmosphere. He expected that the concentration of carbon dioxide in the atmosphere might have fluctuated, even become several times higher but also lower than today. Högbom pointed out that increased concentration of carbon dioxide due to burning of coal since the beginning of the industrial revolution had already become equal to what it could have been in previous times due to natural processes.

In 1899 the American geologist Thomas Chamberlin (1843–1928) published a comprehensive paper on the circulation of carbon dioxide on the earth, in the oceans and the atmosphere, both during times of glaciation and interglacials (Chamberlin, 1899). He advanced hypotheses of how the concentration of carbon dioxide in the atmosphere fluctuated, how it diminished during glacial periods when the sea ice blocked the oceans but evaporated to the atmosphere when the sea ice disappeared. The meteorologist Nils Gustaf Ekholm (1848–1923) presented in the Chemical Society of Stockholm (1893 and 1899) astronomical and meteorological conditions that might cause ice ages. Ekholm held that longtime astronomical fluctuations in radiation could not cause ice ages (Ekholm, 1901).



From top left: James Croll (1821–1890), Milutin Milankovitch (1879–1958), Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768–1839), John Tyndall (1822–1893), Eunice Newton Foote (1819–1888), Svante Arrhenius (1859–1937), Arvid Gustaf Högbom (1857–1940), Nils Gustaf Ekholm (1848–1923), Thomas Chrowder Chamberlin (1843–1928), Knut Johan Ångström (1857–1910), Guy Stewart Callendar (1898–1964), Gilbert Norman Plass (1920–2004), Hans Suess (1909–1993), Roger Revelle (1909–1991), Bert Bolin (1925–2010), Erik Eriksson (1917–2019), Charles David Keeling (1928–2005) and Syukuro Manabe (1931–). *Brautryðjendur að skilningi á þætti andrúmslofts í veðurfari á jörðinni, orsökum ísalda og gerð líkana um þátt koltvísýrings í orsökum ísalda. Fræðimenn sem lýstu tregri upptöku koltvísýrings í hafinu.*

Following the lectures and the papers of Högbom and Ekholm the chemical physicist Svante Arrhenius (1859–1937) published a model calculating changes in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere and the radiation energy reaching the surface of the earth (Arrhenius, 1896, 1901, 1903). He estimated that if the concentration declined by 50%, the temperature on the surface of the earth would be lowered by 4–5°C on the average over all latitudes, but that was the same as the cooling during the last glaciation compared with the present climate. Doubling the concentration of carbon dioxide could on the other hand increase the temperature by 5°C. Arrhenius expected the concentration of carbon dioxide to influence both the temperature and humidity in the atmosphere. By lowering the concentration cooling would take place, evaporation of water diminishes, humidity tends to decline in the air, rain and snowfall increase. Even a minor cooling might start such a feedback and initiate an ice age in the northern hemisphere. In contrast increased concentration of carbon dioxide might lead to global warming and water vapour to remain high in the atmosphere – a gas that has the largest impact on keeping the air warm. Further, Arrhenius (1903) pointed out that the burning of fossil fuel in industry might increase the concentration of carbon dioxide in the next few centuries.

Arrhenius assumed that the strength of infra-red radiation from the earth was comparable to that from the moon (a satellite without an atmosphere), as measured by the American astronomer Samuel Pierpont Langley (1834–1906) (Langley, 1889). Arrhenius estimated how such radiation decreased with increased water vapour and carbon dioxide in the atmosphere. Gustaf Ekholm supported the theory of Arrhenius and suggested that changes in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere were much more influential for climate than long-term fluctuations in the solar radiation reaching earth. Ekholm (1901) described superbly why infrared radiation from the earth did not easily pass through the atmosphere but reflected from every single warm and humid layer and did not escape out to space until reaching cold layers on the top of the atmosphere, where the air was thinner and colder than closer to the earth's surface. The atmo-

sphere could not be looked at as a single slab. Further Ekholm reckoned that humankind might in the future regulate climate by controlling the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. He initiated storm warnings in Sweden. Ekholm was the leader of the Swedish expedition to Svalbard in the first International Geophysical Year 1882–1883. He intended to join the polar expedition of Salomon August Andrée (1854–1897) in 1897 which aimed at reaching the north pole but withdrew from that because of disagreement about the safety of the air balloon.

The physicist Knut Johan Ångström (1857–1910) criticized the model of Arrhenius and believed that water vapour and carbon dioxide absorbed infra-red radiation on the same wavelengths. Carbon dioxide would add little to what water vapour had already absorbed (Ångström 1900, 1901). The critique of Ångström was significant for the acceptance of Arrhenius' theory. Most scientists thought increased concentration of carbon dioxide in the atmosphere would not lead to global warming (e.g. Brooks, 1926; Simpson, 1938–40). Meteorologists also pointed out that the model of Arrhenius was a great simplification of the complicated transport of heat around the world, because it dealt only with radiation but not how cloud cover would change due to warming. Clouds could affect the temperature of the atmosphere because they reflect solar radiation and that leads to cooling. On the other hand they absorb infrared radiation and thereby cause warming. However, this impact was limited because the water vapour condenses and falls to the earth as precipitation. No processes can continuously increase the water vapour in the atmosphere because its content in the atmosphere is the same as the precipitation that falls on the earth in one week. Water vapour is the only gas in the atmosphere that can become fluid on the earth.

Scientists pointed out that the model of Arrhenius did not deal with transport of heat by the oceans and air masses. Furthermore, his model did not describe the flow of heat to the upper atmosphere. Nor did it account for the fact that the ocean and vegetation, forests, and mires, could absorb the gases from the atmosphere. Throughout earth's history equilibrium has been reached in the global circulation of substances

and energy between the spheres of the earth. And many expected that would continue. During the mid-20th century, it was even suggested that radioactive waste from nuclear power plants might be dumped into the ocean.

Just before the start of the Second World War the British engineer Guy Stewart Callendar (1898–1964) again took up the discussion of the theory of Arrhenius (Callendar, 1938). Seven years before that the American physicist Edward Olson Hulburt (1890–1982) supported the theory that decreased concentration of carbon dioxide in the atmosphere might have caused ice ages (Hulburt, 1931). Callendar compiled records of air temperature worldwide after 1885 and concluded that they clearly showed warming and that agreed with model computations of warming on the earth due to increased concentration of carbon dioxide, which he considered to have been 10% over the last 50 years (Callendar, 1958, 1961). However, most meteorologists still questioned the idea that a single gas could cause climate change.

After 1940 the accuracy of spectrometry advanced and it became evident that there was not a full overlapping of the absorption of water vapour and carbon dioxide. The Canadian Gilbert Norman Plass (1920–2004) collected in 1955 results of computer models of radiation in the atmosphere, described the properties of each layer in the atmosphere and explained that in the highest levels of the atmosphere water vapour had little influence on the absorption of radiation (Plass 1956a,b,c,d; 1959). Plass argued that it was obvious that with increased amount of carbon dioxide in the atmosphere, less and less infrared radiation escaped from the earth. He estimated that in the 20th century temperature would increase by 1 °C, if the concentration of carbon dioxide increased by 50%, but 3,6 °C if it doubled.

Now scientists directed their attention to the global carbon cycle. First, the flux between the atmosphere and the sea and second, the mixing of chemicals with ocean currents (Weart, 2024). One of those who lead these studies was the American oceanographer Roger Revelle (1909–1991), the head of the Scripps Institute of Oceanography in California. Revelle did research work for the US Army during the

cold war. In those years people became increasingly concerned about pollution from radioactive disposal and distribution of radioactive material from nuclear bombs. In 1955 the research team of Revelle reported that radioactive material from sub-sea nuclear explosions did not dilute in the sea but collected in a thin surface layer of the ocean. A new technique was then available for dating by radioactive C¹⁴. The Austrian-American chemist Hans Suess (1909–1993) published results that indicated that the proportion of radioactive and non-radioactive isotopes of carbon in the atmosphere had changed (Suess, 1953). The radioactive isotope C¹⁴ continuously forms high in the atmosphere when cosmic radiation collides with nitrogen atoms, N. Suess was working on dating of trees by comparison of the number of annual tree rings and the concentration of radioactive C¹⁴ in the trees. He also reported the ratio between the C¹⁴ isotope and the non-radioactive isotopes C¹² and C¹³. This ratio has changed with time. The younger the trees, the higher the ratio of old non-radioactive carbon in them. He concluded that due to burning of fossil fuel, the concentration of non-radioactive carbon had increased in the atmosphere. Vegetation, buried in the earth over many millions of years became coal and oil, by which time it had lost all its radioactivity. This technique the scientists now wanted to apply to study how carbon dioxide dissolved in shallow water and how it mixed in the entire sea. When the partial pressure of carbon dioxide in the sea increases, the sea water reacts and becomes more acidic and releases carbon dioxide. The residence time of atmospheric carbon dioxide in the ocean was unknown. Moreover, knowledge about ocean mixing was limited. The experience gained from sub-ice nuclear bombs indicated that radioactive isotopes could remain for years and mix slowly into the deeper sea. Using carbon C¹⁴ measurements it could be concluded that the mean dwelling time of carbon in the atmosphere was ten years until it diluted into seawater. On the other hand, it would take hundreds of years for the carbon to spread over the entire ocean. However, in general it was believed that the oceans could absorb all the carbon dioxide emitted to the atmosphere from industry in the future. Mankind did not need to worry that increased input of carbon

dioxide to the atmosphere changed the climate. At the same time scientists were aware that the concentration of carbon dioxide did actually increase in the atmosphere. Revelle had reservations. Even though the sea absorbed more carbon dioxide from the atmosphere it reacts against the acidification and delivers the carbon dioxide back to the atmosphere. The concentration of carbon dioxide in the atmosphere controls the concentration in the sea, not vice versa. Revelle pointed out this difficulty in a conference in 1957 but did not mention this in a paper he wrote in the same year (Revelle and Suess, 1957; Weart, 2024). There he wrote “Human beings are now carrying out a large-scale geophysical experiment of a kind that could not have happened in the past nor be reproduced in the future.”

Two years later the Swedish meteorologists Bert Bolin (1925–2010) and Erik Eriksson (1917–2019) explained finally why salt sea reluctantly absorbs carbon dioxide from the atmosphere (Bolin and Eriksson, 1959 a,b). They showed that rapid mixing between the atmosphere and the sea took place only in the uppermost 2% of the ocean. Since then, it has been clear to scientists that one could not rely on the oceans to be able to absorb fast enough the increased production of carbon dioxide from industry. The residence time of carbon dioxide and methane in the atmosphere is so long that their impact on the longwave radiation from the earth would last in the atmosphere over a hundred years, even though it was possible to stop their input. Today the resistance of sea water to absorb the increased input of carbon dioxide is described by the Revelle factor, in honour of Revelle. Revelle also initiated reliable measurements of carbon dioxide in the atmosphere. C. D. Keeling (1970) developed new precise techniques for the task.

In the International Geophysical Year 1957, regular measurements of the concentration of carbon dioxide in the atmosphere were initiated in Antarctica and on Mauna Loa, Hawaii, in the Pacific Ocean, far away from pollution by industry. Soon it became evident that the concentration of carbon dioxide increased every year (Keeling, 1970). Before the beginning of the industrial revolution, it was 280 ppm but in 2024 it reached about 427 ppm on Mauna Loa (Keeling *et al.*, 1976;

<https://arctic-news.blogspot.com/2024/08/carbon-dioxide-growing-rapidly.html>).

Bert Bolin emphasized international collaboration on the cause of global warming (Bolin, 2007). In 1988 he became the first chairman of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) which was awarded the Nobel Peace Prize in 2007 “for efforts to build and disseminate greater knowledge about man-made climate change, and to lay the foundations for the measures that are needed to counteract such change.”

In the 1960s climate models appeared, which combined ocean and the atmosphere of the entire world (Manabe and Wetherland, 1964; Manabe and Strickler, 1967; Manabe and Bryan, 1969). The models described accurately how augmented concentration of carbon dioxide causes warming so evaporation increases because warm air can contain additional humidity. With increased water vapour the air temperature rises (named Water vapour feedback). For the contribution to this research the Japanese–American physicist Syukuro Manabe received the Nobel Prize in Physics in 2021.

Final remarks

The simple model of Arrhenius, describing the influence of carbon dioxide on climate, pointed out the impact of air pollution caused by burning fossil fuels. Arrhenius himself did not predict any substantial warming of the atmosphere; he did not know about the increasing rate of carbon dioxide injected to the atmosphere that took place after the second world war by increased burning of fossil fuels.

The contribution of glaciologists to the research on climate change has been significant. The shrinking of glaciers all over the earth is one of the clearest indications of global warming. This became obvious after the 1980s. Transport of heat over the globe increased, both in the atmosphere and the ocean, from low latitudes to polar regions. The westerlies moved closer to the polar regions. Extremes in weather became more frequent, including heat waves and floods and meteorological records were broken. At that time shortage of meteorological observations caused some doubts whether observed warming was similar in all seasons, global or limited to specific regions.

After 2010 it became obvious that sea ice in the northern hemisphere was melting faster than it had done for ten thousand years. The transport of heat over the globe, both in the air and the sea, from tropical regions toward the polar regions changed remarkably from what it had been before. Snow melted earlier in the spring and fell later in the autumn. The reflection of solar radiation from the surface of the earth decreased, dark land emerged when snow melted and glaciers retreated. Autumns became warmer, as did winter and springs. Along the coasts of Euro-Asia and Alaska sea ice diminished in the autumn. Sea ice disappeared during the summers and the ocean received increased solar radiation. Summer solar radiation warmed up the sea. All this has caused two to three times greater warming in the polar regions than in other parts of the earth. In that respect we can explain the warming of the polar regions reported by Hans Ahlmann early in the 20th century, now called arctic amplification (cfr. Björnsson, 2023).

After 2000 shrinking of glaciers accelerated in Greenland and West-Antarctica. The rate of sea level rise was 4.5 mm/a in 2023 and half of it is due to melting of glaciers (Hamlington *et al.*, 2024). Rising sea level is one of the most alarming consequences of global warming. Because of warmer air and ocean temperature, melting of the ice shelves calving from West Antarctica and Greenland has increased. The main contributor is West Antarctica where ice shelves may become unstable (Mercer, 1978; Joughin and Alley, 2011) and disintegrate as sea level rises. The bed slopes inland and with a rise in sea level, larger part of the shelves floats up and the buttressing against flow from the inland ice sheet diminishes. Scientists have suggested that the melting of ice in West Antarctica may elevate global sea level by 60 cm by 2100 and 3 m before 2200. This would have frightening impacts in all coastal areas across of the globe.

Saga hugmynda um loftslagsbreytingar 1820–2020

Jökla- og veðurfræðingar lýstu rýrnun jökla á norður-slóðum á fyrrihluta 20. aldar. Hlýir suðrænir straumar í lofti og í sjó töldust orsakavaldar. Þessir fræðimenn settu ekki frekar fram kenningar um orsakirnar,

en ræddu um sveiflur í geislunarstyrk sólar og breytingar á vindáttum. Þeir hvöttu til jöklamælinga, sem leitt gætu til skilnings, og fyrir tilstuðlan eðlisfræðinga, sem fengu áhuga á málinu, jókst skilningur á náttúruöflunum, sem þarna voru að verki.

Spor ísalda

Til öndverðrar nítjándu aldar má rekja þáttaskil í umræðu um loftslagsbreytingar á jörðinni. Fyrir þann tíma var talið, að loftslag hefði verið svipað frá örófi alda. Þótt það hefði sveiflast milli kaldra og hlýrra tímabila náði það ávallt jafnvægi á ný; sveiflaðist til langs tíma um stöðugt meðaltal. Á fjórða áratugi 19. aldar fundu jarðfræðingar hins vegar vísbendingar um að miklar breytingar hefðu orðið á loftslagi á jörðinni, spor fundust eftir rof og framburð löngu horfinna jökulbreiða, sem höfðu legið yfir meginlöndum (Esmark, 1824; Agassiz, 1840; Venetz-Sitten, 1861; Tinkler, 1985; Hestmark, 2018). Undir lok 19. aldar töldu jarðvísindamenn sig jafnvel hafa fundið merki um fjögur jökulskeið á kvartertíma (s.l. 2,6 milljónum ára). Miklir jöklar hefðu þá orðið til, en síðan horfið á hlýskeiðum (Penck og Bruckner, 1909).

Rekja má í stuttu máli, hvernig jarðfræðingum tókst að öðlast þennan skilning. Á sjötta áratug 19. aldar höfðu þeir rakið jökulgarða langt suður til mið-Evrópu, sem ísbreiður höfðu ýtt fram og fundið grettistök eða villugrjót (e. glacial erratics), sem jöklar skildu eftir sig, þegar þeir hopuðu á hlýskeiðum. Síðan röktu menn sögu loftslags- og jöklabreytinga frá síðasta jökulskeiði (de Geer, 1912). Með því að tengja saman gögn um jökulset og steingervinga varð þeim ljóst, að jökulskeiði lauk fyrir 12 þúsund árum, jöklar hurfu, og við tók hlýskeið, sem stendur enn.

Spor sáust um, að sjávarborð hefði lækkað. Það benti til þess, að stór hluti vatns á jörðinni hefði fyrrum safnast í miklar ísbreiður uppi á fastalandi. Farg íssins þrýsti landinu niður, jafnvel hundruð metra. Þegar ís leysti, hækkaði sjávarborð, allt að 120 m, en á svæðum, þar sem land reis hærra, sáust forn fjörumörk á strandsvæðum hátt yfir núverandi sjávarmáli. Jarðfræðingar fundu steingerðar plöntu- og dýraleifar, sem finnast aðeins við kaldara loftslag en er nú á þessum sömu slóðum, einnig skeljar og fiskbein í stöðuvötnum og á landi, sem áður var sjávar-

botn. Aldur lífrænu leifanna greindist með talningu áhringa í trjám og fjölda setlaga, sem jökulár höfðu borið fram hvert sumar, auk greininga á frjókornum og hliðsjónar af öskulögum í jarðvegi. Frá miðri 20. öld hefur aldur einnig verið metinn með geislakolsmælingum. Þannig aldursgreindust í jarðlögum spor eftir æ fleiri loftslagssveiflur.

Upp úr 1960 urðu enn tímamót í rannsóknum, þegar unnt varð að lesa fornloftslag úr borkjörnum frá Grænlandsjökli, jöklum á Suðurskautslandi og í djúphafsseti í Kyrrahafi. Hitastig og efnasamsetning andrúmslofts voru greind í loftbólum og súrefnis- og vetnissamsætum í jökulís og kalkskeljum götunga, sem féllu á sjávarbotn og grófust þar í leðju (Emiliani, 1966). Hlutfall súrefnissamsæta í sjó, sem lífverur tóku upp, breyttist með hitastigi sjávar. Einnig könnuðu þeir jöklabreytingar á kuldaskiði, sem stóð frá 14. öld fram til loka 19. aldar og nefnist litla ísöld.

Skilningur á loftslagsbreytingum

Þegar spor eftir ísaldir fundust, hófst umræða um orsakir þeirra, hvað gæti skýrt, að ísaldir kæmu og færu. Bent var á, að ísaldir gætu tengst hægfara breytingum í styrk sólgeislunar, sem bærisk til jarðar. Frakkinn Alphonse Adhémar (1797–1862) varpaði fram þeirri tilgátu árið 1842, að ísaldir væru í takt við breytingar á möndulhalla jarðarinnar (Adhémar, 1842). Hallinn er nú $23,5^\circ$, en breyttist reglulega frá $21,4^\circ$ til $24,4^\circ$ á 41.000 ára fresti. Sjá t.d. <https://www.stjornuframfrædi.is/solkerfid/jordin/> og <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Milankovitch>

Skotinn James Croll (1821–1890) benti árið 1864 á áhrif þess, að lögum sporbrautar jarðar breyttist á 100.000 árum frá því að vera nær hringlaga í að verða sporöskjulaga (Croll, 1864). Reyndar hafði franskur stjörnufræðingurinn Urbain Leverrier þegar lýst þessu árið 1858 og haldið því fram, að jörð væri því mismunandi nærri sólu, vetur væru örlítið lengri á suðurhveli en norðurhveli, sem gæti skýrt hina miklu ísbreiðu á Suðurskautslandinu. Croll spurði einnig, hvort kólnun á norðurhveli kæmi af stað keðjuverkun, sem ylli ísöld. Í fyrstu stækkuðu ísbreiður, en þar með ykist endurkast sólgeislunar frá yfirborði jarðar. Við það kólnaði andrúmsloft, og aukinn snjór félli,

sem svo ylli enn frekari snjósöfnun, og ferlið héldist eftir það við með sjálfstýringu. Auk þess breyttist stefna mönduls jarðar vegna möndulveltu (precession) jarðarinnar, þar sem möndullinn ritaði hring um stefnu lóðlínu á sporbaug jarðar á 26.000 árum líkt og skopparakringla, sem spinnst eftir gólfi (vegna aðdráttarafls sólar og tungls), og við það breyttist styrkur sólgeislunar, sem félli á yfirborð jarðar. Croll var einnig manna fyrstur til þess að ræða mikilvægi hafstrauma, áhrif þeirra á loftslag og hvernig þeir eru tengdir staðvindum.

Serbinn Milutin Milankovitch (1879–1958) sýndi með útreikningum samanlögð áhrif þessara þátta (Milankovitch, 1920, 1941). Þýsk-rússneski veðurfræðingurinn Wladimir Köppen (1846–1940) og Milankovitch settu síðan fram þá kenningu, að þeir gætu valdið langvinnum breytingum og orsakað ísaldir. Þegar drægi úr sólgeislun á norðurhveli, svo að sumur þar yrðu köld, gæti snjór tekið að safnast fyrir, jökulbreiður og hafís vaxið og aukinn hluti sólgeislunar endurvarpast (Köppen og Wegener, 1924). Þessi tilgáta skýrir þó ekki, hvers vegna ísöld er samtímis á báðum pólsvæðunum. Heildargeislun, sem berst til jarðar, helst hin sama, en hún dreifist mismunandi um jarðaryfirborð. Þegar annar helmingur hnattarins fær minni geislun, þá fær hinn aukna. Fræðimenn tóku reikningunum fálega, þeir bentu til þess, að loftslag hefði sveiflast oftár en greint hafði verið í jarðlögum. Þegar ummerki um fjölmargar loftslagssveiflur fundust í djúphafsseti Kyrrahafsins á 7. áratug 20. aldar, sást hins vegar gott samræmi við líkanreikninga Milankovitch og kenninga hans og Köppens (Berger, 1988). Þá varð ljóst, að jökulskeiðin fjögur, sem kunn voru um aldamótin 1900, voru aðeins þau síðustu af 50 kuldaskiðum ísaldar. Greinilega kom fram, að síðustu milljón ár hefur hitastig sveiflast reglubundið á 100 þúsund ára fresti, kuldaskið skiptast á, rofin af stuttum hlýskeiðum (þegar allar þrjár stjarnfræðilegu sveiflurnar verka saman). Gangi það enn eftir, mætti ætla, að kólni á næstu 20 þúsund árum, en mengun mannkyns á andrúmslofti gæti þó breytt því.

Nú er haldið, að sveiflur í styrk sólgeislunar (þótt litlar séu), sem Milankovitch lýsti, setji af stað langvinnar loftslagsbreytingar, og þær magnist við hringrás loft- og hafstrauma, sem stýra flutningi

varma og raka frá jarðarmiðju til pólsvæða. Stjarnfræðilegar orsakir séu upphaf frekar en full skýring á sveiflum kulda- og hlýskeyða (Thompson, 2021). Fleira þyrfti til þess að skýra, hvers vegna ísaldir væru samtímis á báðum heimshvélum. Er nú talið að flutningur varma með hafstraumum ráði þar mestu (Shakun og fl., 2012).

Lofthjúpurinn og veðurfar jarðar

Skilning eðlisfræðinga á áhrifum lofthjúps jarðar á veðurfar má einnig rekja til 19. aldar. Árið 1824 benti franskur eðlis- og stærðfræðingurinn Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768–1839) á, að andrúmsloftið hlýti að valda því, að hlýrra væri á jörðinni en ætla mætti, ef sólgeislun (sem hann kallaði bjarta geislun) réði því ein (Fourier, 1824). Ástæðuna taldi hann vera þá, að sólarorka kæmist auðveldlega í gegnum andrúmsloftið og vermdi yfirborð jarðar en geislun frá hlýrri jörðinni (myrk geislun, uppgötvuð um 1800, nú nefnd innrauð) kæmist ekki greiðlega upp í gegnum andrúmsloftið út í geiminn. Lofthjúpurinn næði að halda í varmaorkuna og verkaði sem hlý ábreiða utan um jörðina. Fourier ræddi ekki um efnasamsetningu andrúmslofts í þessum varmaskiptum, en hann taldi, að vatnsgufa í andrúmslofti réði miklu um hitastig þess.

Um miðja 19. öld sýndi bandaríski vísindamaðurinn Eunice Newton Foote (1819–1888) með tilraunum, að geislun frá sól hitaði loft í lokuðu röri mett að koltvísýringi eða vatnsgufu meira heldur en þurt loft eða loft með vetni (Foote, 1856). Foote var því fyrst til að benda á tengsl styrks efna í andrúmslofti og loftslags jarðar. Kunnust var hún þó á sínum tíma sem kvenréttindakona (suffragetta) og listmálari.

Írski eðlisfræðingurinn John Tyndall (1822–1893) sýndi með litrófsmælingum (árið 1859, væntanlega án þess að þekkja verk Foote (Jackson, 2019)), að af gastegundum í andrúmslofti drægju vatnsgufa og koltvísýringur mest til sín af varmageislun frá jörðu; þau næðu að fanga mestalla geislun frá innrauðum bylgjulengdum og væru á þann hátt ógegnsæ (Tyndall, 1861). Þessar tvær gastegundir réðu því mestu um, hvert hitastig andrúmsloftsins væri, - og vatnsgufan tvisvar til þrisvar sinnum meira en koltvísýringurinn, að hans mati. Án vatnsgufu í andrúmslofti risi sól hvern dag yfir helfrosinni jörð. John Tyndall var frum-

herji í jöklafræði, höfundur rits um jökla í Ölpunum og frækinn fjallgöngumaður. Hann ræddi um hreyfingu jökla, og honum var vel kunnugt um þykka jökla, sem þakið höfðu nyrstu lönd Evrópu.

Foote og Tyndall vissu, að koltvísýringsstyrkur í andrúmslofti hafði aukist við kolabrennslu allt frá iðnbyltingu, og að koltvísýringur gæti valdið jarðarhlýnun. Þau töldu, að þetta kæmi sér vel fyrir vöxt plantna og yki fæðu fyrir mannkynið. Á köldum árum 19. aldar höfðu menn þó áhyggjur af því, að framundan væri kuldaskið. Flestum þótti, að ein gastegund ylli ekki tiltakanlegum loftslagsbreytingum. Það var ekki fyrr en um miðja 20. öld, að menn tóku að ræða af alvöru, hvort mannkynið kynni að valda skaðlegri hlýnun jarðar með kolabrennslu.

Líkön um áhrif koltvísýrings á loftslag

Rétt fyrir aldamótin 1900 var mikil umræða um orsakir ísalda í Efnafræðifélagi Svíþjóðar (Kemistsamfundet). Athygli beindist að breytingum í efnasamsetningu andrúmslofts og á loftslag, einkum koltvísýrings, vegna þess að styrkur hans gæti hafa breyst á löngum tíma við efnahvörf milli bergs, hafs, lofts og lífríkis. Jarðfræðingurinn Arvid Gustaf Högbom (1857–1940) birti grein um langvinnar og hægvirkar breytingar, sem orðið hefðu á koltvísýringsstyrk í andrúmslofti á tímumsköldum jarðsögunnar (Högbom, 1894). Hann greindi frá því, að koltvísýringur væri bundinn í setlögum og plöntum, og haf drægi hann til sín; einnig hvernig veðrun bergs og eldvirkni bæru koltvísýring til andrúmsloftsins. Högbom taldi að koltvísýringsstyrkur andrúmsloftsins hefði sveiflast verulega, jafnvel orðið margfalt meiri og einnig minni en nú. Högbom benti á, að aukinn koltvísýringsstyrkur vegna brennslu kola frá upphafi iðnbyltingar væri þegar orðinn jafn því, sem hann gæti áður hafa verið af náttúrulegum orsökum.

Árið 1899 ritaði bandaríski jarðfræðingurinn Thomas Chrowder Chamberlin (1843–1928) ítarlega grein um hringrás koltvísýrings á jörðinni, í hafi og lofti, bæði á jökulskeiðum og hlýskeyðum (Chamberlin, 1899). Hann setti fram tilgátur um sveiflur í koltvísýringsstyrk andrúmsloftsins, hvernig styrkurinn minnkaði á jökulskeiðum, þegar koltvísýringur í hafi væri lokaður undir hafís, en leitaði upp til

andrúmsloftsins, þegar hafís hyrfi, og það flýtti fyrir hlýnun. Veðurfræðingurinn Nils Gustaf Ekholm (1848–1923) kynnti í Efnafræðifélagi Svíþjóðar (1893 og 1899) stjarnfræðilegar og veðurfræðilegar aðstæður, sem gætu hafa valdið ísöldum. Hann taldi langtímasveiflur í sólargeislun ekki meðal þeirra (Ekholm, 1901).

Í framhaldi af fyrirlestrum og greinum Högboms og Ekholms birti eðlisefnafræðingurinn Svante Arrhenius (1859–1927) líkanreikninga um breytingar í styrk koltvísýrings í andrúmslofti og orku geislunar, sem berst að yfirborði jarðar (Arrhenius, 1896, 1901, 1903). Arrhenius taldi, að helmingaðist styrkur koltvísýrings, gæti hitastig yfirborðs jarðar lækkað um 4–5°C að jafnaði yfir allar breiddargráður jarðar, en það væri jafnt þeirri kólnun frá núverandi loftslagi, sem orðið hefði á síðasta jökulskeiði. Tvöföldun koltvísýringsstyrks gæti hins vegar hækkað hitastigið um 5°C. Arrhenius áleit að styrkur koltvísýrings gæti bæði haft áhrif á hitastig og raka í andrúmsloftinu. Við lægri styrk kólnaði, uppgufun vatns minnkaði, raki héldist síður í lofti, rigning og snjócoma ykjust, fannbreiður stækkuðu, og jörðin varpaði frá sér æ meiru af sólgeisluninni, svo að enn kólnaði. Jafnvel lítil kólnun gæti sett keðjuverkun af stað og valdið ísöld. Arrhenius hélt, að þótt líkan hans væri einfalt, hefði hann bent á meginatriði, sem skýrðu komu ísalda á norðurhveli jarðar. Á hinn bóginn gæti orðið hnattræn hlýnun við aukinn styrk koltvísýrings og vatnsgufa haldist mikil í andrúmslofti, -lofttegund, sem réði mestu um, hve hlýtt loft væri. Þá gat hann (1903) þess, að brennsla mannkyns á jarðefnaeldsneyti vegna iðnaðar gæti aukið styrk koltvísýrings markvert á nokkrum hundruðum ára.

Arrhenius reiknaði með því, að styrkur innrauðrar geislunar frá jörðinni væri svipaður og frá tunglinu (hnetti án lofthjúps), en hana hafði bandaríski stjörnufræðingurinn Samuel Pierpont Langley (1834–1906) mælt frá fullu tungli (Langley, 1889). Arrhenius mat, hvernig slík geislun dofna við aukinn loftraka í andrúmslofti jarðar. Gustaf Ekholm studdi kenningu Arrheniusar og taldi, að breytingar í styrk koltvísýrings í andrúmslofti væru mun áhrifameiri en langtíma sveiflur í sólgeislun, sem bærast til jarðar. Ekholm (1901) útskýrði vel, hvers vegna innrauð geislun frá jörðu

ætti ekki greiða leið upp í gegnum andrúmsloftið, heldur endurvarpaðist hún frá hverju hlýju og röku laginu af öðru og slyppi ekki út í geim fyrr en frá lögum efst í lofthjúpnunum, þar sem loft er þynnra og kaldara, en nær yfirborði jarðar. Ekki mætti líta á andrúmsloftið sem einfalt lag. Ekholm taldi jafnframt, að mannkynið gæti haft áhrif á loftslag á komandi tímum með því að stjórna koltvísýringsstyrk í andrúmsloftinu. Ekholm fór fyrir leiðangri Svía til Svalbarða á fyrsta alþjóðlega jarðeðlisfræðiárinu 1882–1883. Til stóð, að hann færi árið 1897 í heimskautuferð Salomon August Andrée (1854–1897), sem ætlað var að komast til norðurpólsins, en hann hvarf frá því vegna ágreinings við Andrée um öryggi loftbelgsins. Ekholm var upphafsmaður að stormviðvörðunum Svía.

Eðlisfræðingurinn Knut Johan Ångström (1857–1910) gagnrýndi líkan Arrheniusar og taldi, að vatnsgufa og koltvísýringur drægju til sín innrauða geislun á sömu bylgjulengdum. Koltvísýringur myndi litlu bæta við það, sem vatnsgufa hefði þegar dregið til sín (Ångström, 1900, 1901). Gagnrýni Ångströms réði miklu um, að fram á miðja 20. öld töldu menn, að aukinn koltvísýringur í andrúmslofti ylli ekki hlýnun þess (sjá t.d. Brooks, 1926; Simpson, 1938–40). Veðurfræðingar bentu einnig á, að líkan Arrheniusar væri mikil einföldun á flóknum varmaflutningi um jörðina, líkanið fengist eingöngu við geislun, en liti ekki til þess, hvernig skýjahula breyttist við hlýnun. Ský gætu stillt af hitastig andrúmslofts, ský endurvarpa sólgeislun, og við það kólnar, en hins vegar drægju þau til sín innrauða geislun og við það hlýnaði, – þótt því væru reyndar takmörk sett, vegna þess að vatnsgufan þéttist og fellur til jarðar sem úrkoma. Engin ferli geta stöðugt aukið vatnsgufu í andrúmslofti, - magn hennar í lofthjúpnunum er jafnt úrkomu, sem fellur á jörðina á einni viku. Vatnsgufan er eina gastegundin í lofthjúpnunum, sem getur orðið að vökva á jörðu niðri.

Vísindamenn bentu á, að líkan Arrheniusar fjallaði ekki um flutning varma með haf- og loftstraumum (sjá umræðu í grein Helga Björnssonar, 2023). Ennfremur lýsti líkan hans ekki uppstreymi varma til efri hvolf andrúmslofts. Þá töldu fræðimenn, að hafði og gróður, svo sem skógur og mýrar, gætu tekið við gastegundum úr andrúmsloftinu, þar með talið koltvísýringi, þannig að efnajafnvægi héldist milli

hafs, lands og lofthjúps jarðar. Alla jarðsöguna hefði náðst jafnvægi í hringrás efna og orku um hin ýmsu hvel hnattarins, hafs, lífríkis og andrúmslofts, og ætla mætti, að svo yrði enn. Um miðja 20. öld var jafnvel rætt um, að farga mætti í sjóinn geislavirkum úrgangi frá kjarnorkuverum, því lengi tæki sjórinn við.

Laust fyrir upphaf seinni heimsstyrjaldar endurvakti breski verkfræðingurinn Callendar (1898-1964) umræðu um kenningar Arrheniusar (Callendar, 1938). Áður hafði bandaríski eðlisfræðingurinn Edward Olson Hulburt (1890–19) stutt þá kenningu, að lækkan í koltvísýringsstyrks ylli ísöldum (Hulburt, 1931). Callendar tók saman skrá um hitamælingar víða á jörðinni frá 1885 og sagði þær sýna greinilega hlýnun, og að þær féllu vel að líkanreikningum um hlýnun jarðar vegna aukins styrks koltvísýrings, sem hann taldi hafa aukist um 10% á undanförunum 50 árum (Callendar, 1958, 1961). Enn efuðust þó flestir veðurfræðingar um, að gastegund ylli loftslagsbreytingum.

Upp úr 1940 urðu framfarir í litrófsmælingum, og í ljós kom, að á breiðu tíðnisviði er ekki full skör- un milli ísogs (absorption) vatnsgufu og koltvíoxíðs. Kanadamaðurinn Gilbert Norman Plass (1920–2004) dró árið 1955 saman niðurstöður líkanreikninga af geislun í andrúmslofti og lýsti eiginleikum hvers lags í andrúmsloftinu, og að efst hefði vatnsgufa lítill áhrif á geislun (Plass 1956a,b,c,d; 1959). Plass taldi, að ljóst væri orðið, að við aukinn styrk koltvísýrings í lofthjúpnum, slyppi æ minna af innrauðri geislun frá jörðinni. Að mati hans mundi andrúmsloftið hlýna um 1 °C á 20. öldinni, ef styrkur koltvísýrings yxi um þriðjung, en 3,6 °C, ef hann tvöfaldaðist.

Menn beindu nú athygli sinni að því, hve hröð hringrás kolefnis væri um jörðina, höf og andrúmsloft. Huga þurfti annars vegar að efnaskiptum milli andrúmslofts og sjávar og hins vegar blöndun efna með hafstraumum (Weart, 2024). Einn af þeim, sem leiddi þessar rannsóknir, var bandaríski haffræðingurinn Roger Revelle (1909–1991), en hann stýrði Scripps hafrannsóknastofnuninni í Californíu og vann að rannsóknum fyrir bandaríska herinn á dögum kalda stríðsins. Á þessum árum áru uxu áhyggjur manna af mengun frá geislavirkum úrgangi og dreifingu geislavirkra efna frá kjarnorkusprengringum. Árið 1955 greindi rannsóknarhópur Revelles frá því, að

geislavirk efni frá kjarnorkusprengringum neðansjávar þynntust ekki út í sjónum heldur söfnuðust í þunnt lag á yfirborði hafsins.

Ný tækni, sem nú varð tiltæk, var aldursgreining sýna með mælingum á styrk geislakols C^{14} í þeim. Austurísk-bandaríski efnafræðingurinn Hans Suess (1909–1993) birti niðurstöður, sem bentu til þess að hlutfall geislavirkra og ógeislavirkra samsætna kolefnis í andrúmsloftinu hefði breyst (Suess, 1953). Geislavirka samsætun C^{14} myndast stöðugt hátt í lofthjúpnum, þegar geimgeislar rekast á köfnunarefnisatóm, N. Suess vann að aldursgreiningu trjáa með samanburði á fjölda árshringa í trjáviði og styrks geislakols C^{14} í trjáviðnum. Hann skráði einnig hlutfall geislavirku samsætunnar C^{14} og ógeislavirku samsætunnanna C^{12} og C^{13} . Þetta hlutfall hefur breyst með tíma. Því yngri sem trén voru þeim mun herra var hlutfall af gömlu ógeislavirku kolefni í þeim. Hann ályktaði, að vegna bruna gamals jarðefnaeldsneytis væri nú meira af kolefni í andrúmsloftinu, sem öll geislavirkni væri horfin úr (það væri eldra en 50 þúsund ára). Jurtir, sem hefðu legið í jörðu í milljónir ára og orðið að kolum og olíu, hefðu misst alla geislavirkni. Þessa tækni vildu menn nú nota til að kanna, hvernig koltvísýringur leystist upp í grunnu vatni, og hvernig hann blandaðist öllu hafinu. Menn vissu, að þegar hlutþrýstingur koltvísýrings í sjó vex, bregst sjórinn svo við, að hann súrnar og gefur frá sér koltvísýring. Enginn vissi, hve langur dvalartími kolefnis úr andrúmslofti í sjó væri, nokkrar stundir eða 1000 ár. Eins var lítið vitað um blöndun sjávarvatns. Reynslan af geislavirku efnunum frá kjarnorkusprengringum í sjó benti til þess, að þau gætu legið í grunnu sjó í mörg ár og blönduðust seint í dýpra sjávarvatn. Með geislakolsmælingum gátu menn nú ályktað, að meðalævi koltvísýringsameindar í andrúmsloftinu væri um 10 ár, þar til hún leystist upp í sjó. Hins vegar tæki það nokkur hundruð ár, að kolefnið dreifðist um allt vatn í hafinu. Samt var það almennt mat manna, að hafið næði að draga til sín allan koltvísýring, sem líklegt væri, að bærst til andrúmslofts frá iðnaði á komandi árum. Ekki þurfti að hafa áhyggjur af því, að aukinn styrkur koltvísýrings í andrúmslofti breytti loftslagi. Á sama tíma urðu menn þó varir við, að styrkur koltvísýrings í lofti fór vaxandi. Revelle

hafði bakþanka. Þótt sjórinn taki við meiri koltvísýringi úr andrúmslofti, bregst hann til varnar súrnuninni og skilar koltvísýringi til baka. Það væri því styrkur koltvísýrings í andrúmsloftinu, sem réði styrknum í sjónum, en ekki öfugt. Hann benti á þennan veikleika á ráðstefnu 1957, en setti það ekki beint fram í grein, sem hann birti það ár (Weart, 2024). Í greininni (Revelle og Suess, 1957) sagði hann þó: „Mannkynið er að gera jarðeðlisfræðilega tilraun í stærri stíl en áður var gerlegt, og verður ekki endurtekin“.

Tveimur árum síðar skýrðu svo sænsku veðurfræðingarnir Bert Bolin (1925–2010) og Erik Eriksson (1917–2019) endanlega, hvers vegna saltur sjór er tregur til að taka við koltvísýringi úr andrúmslofti (Bolin og Eriksson, 1959a,b). Þeir greindu frá því, að hröð blöndun milli andrúmslofts og sjávar væri aðeins í efstu 2% hafsins. Síðan hefur mönnum verið ljóst, að ekki væri unnt að treysta á, að höfin tækju nægilega hratt við síauknum útblæstri koltvísýrings frá iðnaði. Dvalartími koltvísýrings og metans í andrúmslofti væri svo langur, að áhrifa þeirra á langbylgjugeislun frá jörðu myndi gæta í andrúmslofti í hundruð ára, jafnvel þótt tækist að stöðva útblástur þeirra. Tregðu sjávar að taka við vaxandi útblæstri koltvísýrings í lofti er nú lýst með svonefndum „Revelle factor“ til heiðurs Revelle.

Á alþjóðlega jarðeðlisfræðiárinu 1957 hófust reglubundnar mælingar á styrk koltvísýrings í andrúmslofti á Suðurskautlandinu og á Mauna Loa á Hawaii í Kyrrahafinu, fjarri mengun frá iðnaði. Fljótlega kom í ljós, að styrkur koltvísýrings óx þarna með hverju ári. Fyrir iðnbyltingu var hann 280 ppm (milljónustu rúmmálshlutar), en hafði árið 2024 náð 427 ppm á Mauna Loa (Keeling og fl., 1976; <https://arctic-news.blogspot.com/2024/08/carbon-dioxide-growing-rapidly.html>).

Bert Bolin kallaði saman vísindamenn til alþjóðlegs samstarfs um rannsóknir á orsökum hnattrænna hlýnunar (Bolin, 2007). Hann varð árið 1988 fyrsti formaður alþjóðanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPPC), en nefndin hlaut friðarverðlaun Nóbels 2007 fyrir skilning á hnattrænum loftslagsbreytingum af mannavöldum, og fyrir að hafa kynnt þann skilning almenningi og lagt á ráðin um aðgerðir gegn þessari hlýnun jarðar.

Á sjötta áratug 20. aldar urðu miklar framfarir við gerð tölvulíkana í veðurspám. Japansk-bandaríski eðlisfræðingurinn Syukuro Manabe hóf þá að nota slík líkön við rannsóknir á loftslagsbreytingum. Líkönin tengdu saman haf og andrúmsloft um alla jörðina, útskýrðu myndun skýja og flutningi raka og varma (t.d. Manabe og Strickler, 1964; Manabe og Wetherald, 1967; Manabe og Bryan, 1969). Fram kom, að aukinn styrkur koltvísýrings leiðir til hlýnunar og uppgufunar vatns, og andrúmsloftið hlýnar umfram það sem skýra má eingöngu með auknum koltvísýringsstyrks (nefnt water vapor feedback). Fyrir framlag sitt til þessara rannsókna hlaut Syukuro Manabe Nóbelsverðlaun í eðlisfræði 2021. Var þá komin heildarmynd af áhrifum vatnsgufu og koltvísýrings á loftslag jarðar, sem Eunice Foote, Tyndall og Arrhenius höfðu lagt grunn að.

Lokaorð

Einfalt líkan Arrheniusar af áhrifum koltvísýringstyrks á loftslag jarðar reyndist lýsa vel megináhrifum loftmengunar mannkyns vegna jarðefnaeldsneytisbrennslu. Sjálfur spáði hann því ekki, að fram undan væri veruleg loftslagshlýnun, enda gat hann ekki órað fyrir því, að koltvísýringur í andrúmslofti ykist með þeim hraða, sem varð eftir seinni heimsstyrjöld við brennslu kola, olíu og jarðgass.

Þáttur jöklafræðinga í rannsóknum á loftslagsbreytingum hefur verið mikill. Rýrnun jökla um allan heim er vitnisburður um hnattræna andrúmsloftshlýnun. Það leyndi sér ekki upp úr 1980. Flutningur varma um hnöttinn hafði aukist, bæði í lofti og hafi, frá miðlægum breiddargráðum til norðlægra pólsvæða. Vestanvindabeltið hafði færst nær heimskautum. Öfgar jukust í veðri, hitabylgjur og flóð urðu tíðari. Æ fleiri hitamet voru slegin, en fram til þessa þótti skorta veðurathuganir til að skera úr um, hvort hlýnun væri mismunandi eftir árstíðum og hvort hún væri hnattræn eða bundin við afmörkuð svæði jarðar.

Um 2010 var þó orðið augljóst, að á norðurheimskautsslóðum bráðnaði hafís hraðar en hann hafði gert s.l. 10 þúsund ár. Þá var orðið greinilegt, að flutningur varma um hnöttinn, bæði um haf og loft, frá trópiskum svæðum og miðlægum breiddargráðum til norðlægra pólsvæða hafði breyst verulega, frá því sem var.

Við bráðnun snævar kom land undan jökli og dró úr endurkasti sólgeislunar frá yfirborði jarðar. Hringrás andrúmslofts og varmaflutningur um haf breyttust. Mest hlýnaði á haustin, að vetri og vori við strendur Evrasíu og Alaska, og haffís varð æ minni að hausti. Sumarsól vermdi hafið, andrúmsloftið hlýnaði langt fram á haust. Snjór bráðnaði fyrr á vorin, og hann féll síðar að hausti. Haffís hvarf jafnvel á sumrin við strendur Evrasíu og Alaska. Hafið fékk aukna sumargeislun og hlýnaði. Þegar ís lagði loks að vetri, náði varmi í hafi hins vegar ekki lengur til andrúmslofts. Allt hefur þetta valdið því, að hlýnun hefur orðið tvöfalt til þrefalt meiri á heimskautasvæðum en annars staðar á jörðinni. Í þessu skilningi má skýra niðurstöður Hans Ahlmann um hlýnun pólsvæða á fyrri hluta síðustu aldar. Hlýnunin kallast nú „arctic amplification“.

Eftir aldamótin 2000 herti á rýrnun Grænlandsjökuls og jökulbreiðu vesturhluta Suðurskautslandsins. Sjávarborð reis 4.5 mm árið 2023, helmingur þess er vegna rýrnunar jökla (Hamlington og fl., 2024). Hækkun sjávarborðs er ein ógnvænlegasta afleiðing hnattrænnar hlýnunar. Vegna hlýnunar andrúmslofts og hafstrauma eykst bráðnun íspilja sem kelfa frá vesturhluta Suðurskautslandsins og Grænlandi. Þar sem botni hallar inn að landi getur hækkun sjávarborðs lyft stöðugt stærri hluta íspiljanna á flot og þær orðið óstöðugar, kelfing aukist hratt (Mercer, 1978; Joughin og Alley, 2011), en einnig hert á skriði ísþekjunnar til sjávar vegna þess að fyrirstaða minnkar. Jöklafræðingar óttast því að sjávarborð gæti risið um 60 cm til loka 21. aldar og 3 m fyrir 2200. Það hefði skelfileg áhrif í strandhéruðum um allan heim.

Þakkir

Ritryndur bentu á margt, sem betur mátti fara og eru þeim færðar bestu þakkir.

REFERENCES/HEIMILDIR

- Adhémar, J. 1842. *Révolutions de la mer*. Paris, Carilian-Goeury and Dalmont.
- Agassiz, L. 1840. *Études sur les glaciers*. Neuch Betannier. English edition: Agassiz, L. 1967. *Studies on glaciers*. Preceded by discourse of Neuchâtel (1837). Carozzi, A., Transl.) New York, Hafner. Alley, 2011

- Arrhenius, S. 1896. Über den Einfluss des Atmosphärischen Kohlensäuregehalts auf die Temperatur der Erdoberfläche. In: *Proceedings of the Royal Swedish Academy of Science*, 22, I N. 1, 1–101.
- Arrhenius, S. 1896 On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 41, 237–275.
- Arrhenius, S. 1901. Über die Wärmeabsorption durch Kohlensäure und ihren Einfluss auf die Temperatur der Erdoberfläche. *Annalen der Physik* 4, 690–705. – *Proceedings of the Royal Academy of Science* 58, 25–58.
- Arrhenius, S. 1903. *Lehrbuch der kosmischen Physik* 1, 2, Leipzig, Hirzel.
- Ångström K. 1900. Über die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre. *Annalen der Physik* 308 (12), 720–732.
- Ångström K. 1901. Knut Ångström on atmospheric absorption. *Atmospheric Absorption Monthly Weather Review* 29(6), 268.
- Berger, A. 1988. Milankovitch Theory and Climate. *Reviews of Geophysics* 26(4), 624–657.
- Björnsson, H. 2023. Jöklafræðingur Hans Ahlmann og samstarfsmanna á öndverðri 20. öld. *Jökull* 73, 101–116.
- Bolin, B. and E. Eriksson 1959a. Changes in the carbon dioxide content of the atmosphere and sea due to fossil fuel combustion. In: *The atmosphere and the sea in motion*. Bolin, B. (ed.), p. 130–142. New York, Rockefeller Institute Press,
- Bolin B. and E. Eriksson 1959b. On the exchange of carbon dioxide between the atmosphere and the sea. *Tellus* 12, 274–281.
- Bolin, B. 2007. *A history of the science and politics of climate change. The role of the Intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 277 pp.
- Brooks, C. E. P. 1926. *Climate through the Ages: A Study of the Climatic Factors and their Variations*. New York, Coleman.
- Callendar, G. S. 1938 The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Quarterly J. Royal Meteorological Society* 64, 223–240.
- Callendar, G. S. 1958. On the amount of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus* 10, (2), 243–248.

- Callendar, G. S. 1961. Temperature fluctuations and trends over the Earth. *Quarterly J. Royal Meteorological Society* 87, 371, 1–12.
- Chamberlin, C. T. 1899. An attempt to frame a working hypothesis of the cause of glacial periods on an atmospheric basis. *J. Geology* 7(8), 751–787; 7, 545–584, 667–685, 751–787
- Croll, J. 1864. On the physical cause of the change of climate during geological epochs. *Philosophical Magazine and J. Science* 27, 121–137.
- De Geer, G. 1912. A geochronology of the last 12,000 years. In: Congress geological international Stockholm 1910. C. R. 241–253.
- Ekholm, N. 1901. On the variations of the climate of the geological and historical past and their causes. *Quarterly J. Royal Meteorological Society* 27, 117, 1–62
- Emiliani, C. P. 1966. Paleotemperature analysis of Caribbean cores P6304-8 and P6304-9 and a generalized temperature curve for the past 425,000 years. *J. Geology* 74, 109–126.
- Foote, E. 1856. Circumstances affecting the heat of the sun's rays. *The American J. of Science and Arts*. New York, 22 (66), 382–383.
- Fourier, J. B. J. 1824. Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Annales de Chimie et de Physique*. 27, 136–167.
- Hamlington, B. D., A. Bellas-Manley, J. K. Willis, S. Fournier, N. Vinogradova, R. S. Nerem, C. G. Piecuch, P. R. Thompson and R. Kopp 2024. The rate of global sea level rise doubled during the past three decades. *Comm. Earth Environ.* 5, 601. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01761-5>
- Hestmark, G. 2018. Jens Esmark's mountain glacier traverse 1823 – the key to his discovery of ice ages. *Boreas* 47, 1–10.
- Hulburt, E. O. 1931 The temperature of the lower atmosphere of the Earth. *Phys. Rev.* 38, 1876–1890.
- Högbom, A., 1894. Om sannolikheten för sekulära förändringar i atmosfärens kolsyrehalt. *Svensk kemisk Tidsskrift* 6, 169–177.
- Jackson, R. 2019. Eunice Foote, John Tyndall and a question of priority. *The Royal Society of the history of science*. <https://doi.org/10.1098/rsnr.2018.0066>
- Joughin, I. and R. B. Alley 2011. Stability of the West Antarctic ice sheet in a warming world. *Nature Geoscience* 4(8), 506–513.
- Keeling, C. D. 1970. Is carbon dioxide from fossil fuel changing man's environment? *Proceedings of the American Philosophical Society*. 114 (1), 10–17.
- Keeling, C. D., R. B. Bacastow, A. E. Bainbridge, C. A. Ekdahl Jr., P. R. Guenther, L. S. Waterman and J. F. S. Chin 1976. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus* 28, 538–551.
- Köppen, W. and A. Wegener 1924. *Die Klimate der Geologischen Vorzeit*. Berlin. Gebruder Borntraeger.
- Langley, S. P. 1889. Temperature of the Moon. *American J. Science* 3–38 (228), 421–439.
- Manabe, S. and R. F. Strickler 1964. Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment. *Atmospheric Science* 21, 361–385.
- Manabe, S. and R. T. Wetherald 1967. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmospheric Science* 24 (3), 241–259.
- Manabe, S. and K. Bryan 1969. Climate calculations with a combined ocean-atmosphere model. *J. Atmospheric Science* 26, 786–789. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1969\)026<0786:CCWACO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969)026<0786:CCWACO>2.0.CO;2)
- Mercer, J. H. 1978. West Antarctic Ice Sheet and CO₂ Greenhouse effect – threat of disaster. *Nature* 271 (5643), 321–325.
- Milankovitch, M. M. 1920. Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. *Academie Yougoslave des Sciences et des Arts de Zagreb*, Gauthier-Villars, Paris.
- Milankovitch, M. 1941. *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Belgrade: Königliche Serbische Akademie.
- Penck, A. and E. Bruckner 1909. *Die Alpen im Eiszeitalter*. Leipzig; Tauchnitz.
- Plass, G. N. 1956a. The carbon dioxide theory of climate change. *Tellus* 8, 140–154.
- Plass, G. N. 1956b. Infrared radiation in the atmosphere. *American J. Physics*. 24(5) 303–321.
- Plass, G. N. 1956c. Carbon dioxide and the climate. *American Scientist* 44, 302–316.
- Plass, G. N. 1956d. Effect of carbon dioxide variations on climate. *American J. Physics*. 24 (5), 376–387. <https://doi.org/10.1119/1.1934233>
- Plass, G. N. 1959. Carbon dioxide and climate. *Scientific American*. July, p. 41–47.
- Revelle, R. and H. E. Suess 1957. Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades. *Tellus* 9, 18–27.

- Shakun, J. D., P. U. Clark, F. He, S. A. Marcott, A. C. Mix, Z. Liu, Z., B. Otto-Bliesner, A. Schmitner and E. Bard 2012. Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation. *Nature* 484, 49–54. <https://doi.org/10.1038/nature10915>
- Simpson, G. C. 1938–40. Possible Causes of Change in Climate and Their Limitations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. Proceedings of the Linnean Society of London*.
- Suess, H. E. 1953. Natural radiocarbon and the rate of exchange of carbon dioxide between the atmosphere and the sea. In: Aldrich, L. T., (ed.), *Proceedings of Conference on Nuclear Processes in Geological Settings. National Research Council Publications, Commission on Nuclear Science* 1, 52–56.
- Tyndall, J. 1861. On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connection of radiation, absorption, and conduction. *Philosophical Magazine* Ser. 4, 22, 169–194, 273–285. <https://doi.org/10.1119/1.1934233>
- Tinkler, K. J. 1985, 2020. *A short history of geomorphology*. Routledge, 338 pp.
- Thompson, R. 2021. Croll, feedback mechanisms, climate change and the future. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 112 (3-4), 1–19.
- Wenetz-Sitten, 1861. Mémoire sur l'extensions des anciens glaciers, renfermant quelques explications sur leur effets remarquables. *Nouveaux Mémoires de la Société Helvétique des Science Naturelles* 18, Zurich.
- Weart, S. 2008. The Discovery of Global Warming. <https://history.aip.org/climate/index.htm>
- <https://history.aip.org/climate/Revelle.htm>
- <https://www.stjornufoedi.is/solkerfid/jordin/>
- <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Milankovitch>
- <https://arctic-news.blogspot.com/2024/08/carbon-dioxide-growing-rapidly.html>